

Turbulent structure and particle motion in a particle-laden turbulent flow in a vertical channel

○浜名芳晴, 鈴木雄二, 笠木伸英 (東大工)

Yoshiharu HAMANA, Yuji SUZUKI and Nobuhide KASAGI

Dept. of Mech. Eng., The University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan

Spatio-temporal evolution of near-wall turbulent quasi-coherent structures and the motion of solid particles are investigated with the aid of a conditional averaging method based on the quadrant analysis. The typical time scale of the ejection events is found to be smaller than that of the sweep events. Therefore, the solid particles tend to remain in the low-speed streak due to their smaller traceability to the ejection events, which results in the particle agglomeration in the low-speed streaks.

1. 緒言

混相乱流は、自然界、産業界など多くの分野に関わる流れ形態である。近年、レーザ計測や画像計測の技術の進歩により、固体粒子の運動と流れ場を同時に計測が可能になった¹⁻⁴⁾。また、計算機能力や数値解析手法の進歩により、固体粒子と流体の相互作用を考慮した大規模数値シミュレーション^{5,6)}も行われるようになり、粒子分布の不均一性^{1,2,4)}、乱流統計量や乱流構造の変化^{3,4)}などが報告されている。しかし、乱流中の固体粒子の挙動や固体粒子が乱流場に与える影響などのメカニズムについては依然として不明な点も多い⁷⁾。本研究では、鈴木ら⁴⁾が行った高精度3次元粒子追跡流速計(3-D HDPTV)を用いた鉛直チャネル固液混相乱流の同時計測のデータベースを用いて可視化を行い、壁乱流の準秩序構造と固体粒子運動の時空間位相について検討を行った。

2. PTV データベース

本研究では、鈴木ら⁴⁾による固液混相乱流のPTVデータベースを用いて解析を行う。まず、本データベースの概要を示す。流れ場は、下向き鉛直チャネル回流水槽における、十分に発達した乱流である。壁面摩擦速度とチャネル半幅で定義されるレイノルズ数は、 $Re_\tau=230$ に相当する。固体粒子は球形セラミックビーズ(比重比 $\rho_p/\rho_f=3.85$, 粒子径 $d=380-412\mu\text{m}$)を用い、粒子直径 $d_p^*=4.2$ 、緩和時間 $\tau_p^*=3.6$ 、沈降速度 $u_{s0}^*=7.99$ である。沈降速度 u_{s0}^* に基づく粒子レイノルズ数は、 $Re_p=33$ である。また、固体粒子の投入体積濃度は、固体粒子と流体の相互作用が顕在化する⁸⁾と考えられる $\phi_p=3.2 \times 10^{-4}$ である。

測定体積は、流れ方向、壁垂直方向、スパン方向に $50 \times 25 \times 25 (\text{mm}^3)$ (およそ $500 \times 250 \times 250 (v/u_\tau^*)^3$)であり、トレーサ粒子(流体)と固体粒子それぞれ約400, 200個の瞬時ベクトルが同時に取得され、約20000時刻分のデータとして保存されている。

鈴木ら⁴⁾は、本流れ場において、壁垂直方向、スパン方向の乱れが全領域でやや増加するのに対し、流れ方向の乱れ強さがチャネル中央付近で選択的に増大することを示した。また、4象現解析を用いた条件付き抽出から、低速ストリーク、特にイジェクションイベントの直下で固体粒子の濃度が高いことを示した。

3. 条件付き抽出法による乱流準秩序構造と粒子挙動

本研究では、4象現解析を用いた条件付き抽出法⁹⁾により、乱流の準秩序構造と固体粒子挙動の関係を調べた。イベントの抽出は、 $y^*=15, 60, 100$ で行い、 $-u^*v^* > u_{rms}^*v_{rms}^*$ を抽出条件とした。また、スパン方向 z への非対称性を保存するために、イベント抽出点での w^* の符号に応じて、 z 座標を反転してアンサンブル平均をとった¹⁰⁾。サンプリング領域は流れ方向 x 、壁垂直方向 y 、スパン方向 z に $200 \times 150 \times 200 (v/u_\tau^*)^3$ である。イベント抽出時刻において、イベント抽出点を囲む $-5 < \Delta x^* < 5$ 、 $-100 < \Delta z^* < 100$ 、 $0 < y^* < 150$ の領域に存在する固体粒子について時間的に追跡し、抽出位置からの相対位置として、粒子座標を求めた。

Fig.1, Fig.2に、 $y^*=15$ で抽出されたイジェクション(Q2)、スweep(Q4)イベントに伴う、抽出点を含む y - z 断面内の流体の速度ベクトルを示す。どちらのイベントにおいても抽出点付近に縦渦が存在しており、また、図には示さないがQ2イベントは低速ストリーク、Q4イベントは高速領域の内部に存在している。

Fig.3にQ2, Q4イベントの発生頻度を示す。壁近傍では、Q2イベントの頻度がQ4イベントよりも大きい。固体粒子の速度を4象現で分類すると、 $10 < y^* < 40$ の領域では流体のQ2イベントの発生頻度よりも固体粒子のQ2運動が低いことがわかる。鈴木ら⁴⁾は、固体粒子が低速ストリークに集まるメカニズムとして、Q2, Q4イベントに対する固体粒子の追従性の違いによるものと推測したが、以下では、固体粒子の軌跡の検討からこの点を明らかにする。

Fig.4(a),(b)は、Q4イベント抽出時刻において $-5 < \Delta x^* < 5$ 、 $0 < y^* < 5$ 、 $-5 < \Delta z^* < 5$ に存在する固体粒子の軌跡を、それぞれ、 x - y 断面、 x - z 断面に投影した図である。Q4イベントは高速領域内部で発生するが、高速領域内の粒子濃度が低い。後述するQ2イベントに比べて抽出される固体粒子数が少ない。固体粒子は、流下に伴い z 軸の正の方向(縦渦の回転方向)に移動するが、壁近傍に留まっている。

Fig.4(c),(d)は、Q4イベント抽出時刻において $-5 < \Delta x^* < 5$ 、 $10 < y^* < 15$ 、 $-5 < \Delta z^* < 5$ に存在する固体粒子の軌跡を示した図である。固体粒子はQ4イベントに伴い、壁に近づいていくことがわかる。流れ方向の移動距離は比較的揃っており、本報で観察した領域内に固体粒子が存在する時間(およそ6.7粘性時間)よりもQ4イベントが持続する時間スケールが長いことを示す。

Fig.5(a),(b)は、Q2イベント抽出時刻において $-5 < \Delta x^* < 5$ 、 $0 < y^* < 5$ 、 $-5 < \Delta z^* < 5$ に存在する固体粒子の軌跡を示した図である。この領域では固体粒子の数密度が高く、その多くが壁面に接しながら、流下していく様子が観察される。Q2イベントに伴う縦渦の影響は小さく、固体粒子の y , z 方向の速度は小さい。従って、固体粒子は低速ストリーク内に比較的長い時間とどまっているものと推測される。

Fig.5(c),(d)は、Q2イベント抽出時刻において $-5 < \Delta x^* < 5$ 、 $10 < y^* < 15$ 、 $-5 < \Delta z^* < 5$ に存在する固体粒子の軌跡を示した図である。Fig.5(a),(b)に比べて、固体粒子の軌跡は縦渦の影響を強く受けており、流下に従って、ほとんどの粒子が壁から離れる方向、かつ、 z 軸の正の方向(縦渦の回転方向)に移動している。また、Q4イベントで抽出された固体粒子の軌跡よりも流れ方向の移動距離がばらついており、Q2イベントに伴う流体運動の時間スケールがQ4イベントよりも短いことを示唆する。従って、Fig.3に示した、Q2イベントとQ4イベントへの固体粒子の追従性の相違は、それぞれのイベントの時間スケールの違いによるものと考えられる。なお、 $y^*=60, 100$ において同様に行った4象現解析の結果では、Q2, Q4イベントに伴う固体粒子運動に相違は見られず、これらは壁近傍で特徴的な現象と考えられる。

4. 結論

鉛直チャンネル固液混相乱流の PTV データベースを用いて、乱流の準秩序構造と固体粒子の挙動の可視化を行なった。特に乱流の特徴的な構造であるイジェクションとスイープと固体粒子運動の時空間位相について検討を行い以下の結論を得た。

(1) Q2 イベントにより抽出される低速ストリーク内では、固体粒子の数密度が高く、粘性低層内の固体粒子の多くは上部の縦渦の影響を受けずに壁面に近接したまま流下する。

(2) Q2 イベントに伴う流体の運動の時間スケールは、Q4 イベントよりも小さいため、Q2 イベントに対する固体粒子の追従性は相対的に低く、低速ストリークから固体粒子が放出されにくい原因となっている。

文献

- 1) J. D. Kulick, J. R. Fessler & J. K. Eaton: *J. Fluid Mech.* 277(1994)109.
- 2) D. Kaftori, G. Hetsroni & S. Banerjee: *Phys. Fluids* 7(1995)1095.
- 3) 菱田公一, 半澤陽, 榊原潤, 佐藤洋平, 前田昌信: 機論 B, 62-593(1996)18.
- 4) 鈴木雄二, 池谷基史, 笠木伸英: 機論 B, (2000), 投稿中.
- 5) S. Elghobashi & G. C. Truesdell: *Phys. Fluids* 8 (1996)2733.
- 6) Y. Pan and S. Banerjee: *Phys. Fluids* 9(1997)3786.
- 7) C. T. Crow, T. R. Trutt & J. N. Chung: *Annu. Rev. Mech.* 28(1996)11.
- 8) R. A. Gore & C. T. Crow: *Int. J. Multiphase Flow* 15 (1989)279.
- 9) J. M. Wallace, H. Eckelmann & R. S. Brodkey: *J. Fluid Mech.* 54(1972)39.
- 10) Y. G. Guezennec, U. Piomelli & J. Kim: *Phys. Fluids A* 1(1989)764.

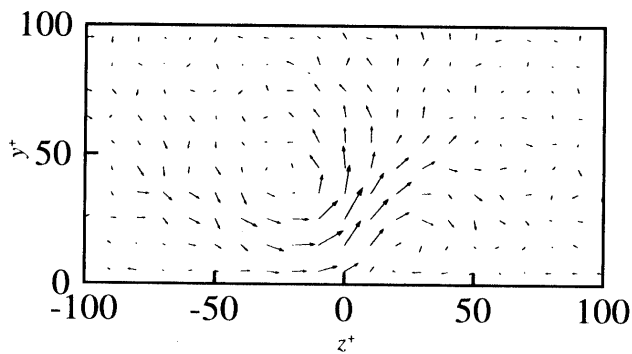


Fig.1 Conditional-averaged velocity field associated with the ejection(Q2) event at $y^+=15$.

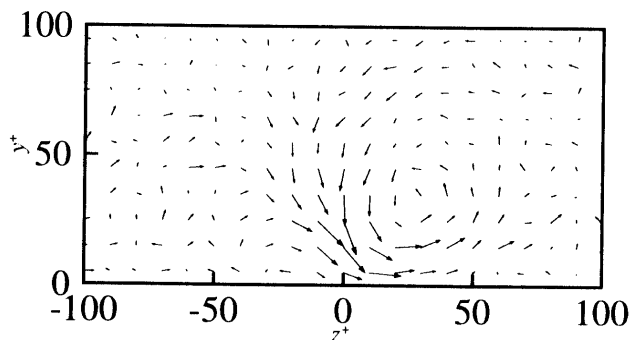


Fig.2 Conditional-averaged velocity field associated with the sweep(Q4) event at $y^+=15$.

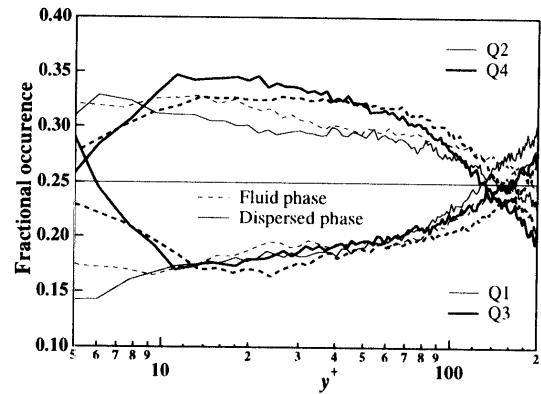


Fig.3 Fraction of occurrence of the ejection and sweep events.

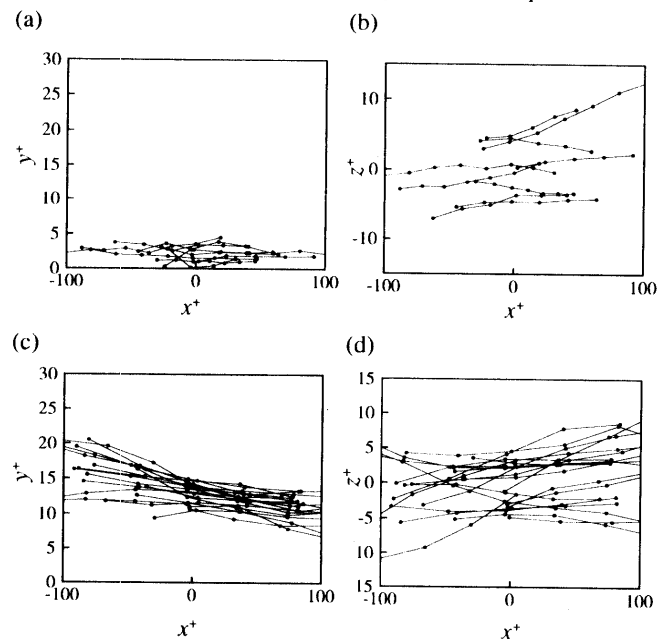


Fig.4 Typical trajectories of solid particles with the sweep(Q4) event.

(a) x - y plane, $0 < y^+ < 5$, (b) x - z plane, $0 < y^+ < 5$,
(c) x - y plane, $10 < y^+ < 15$, (d) x - z plane, $10 < y^+ < 15$.

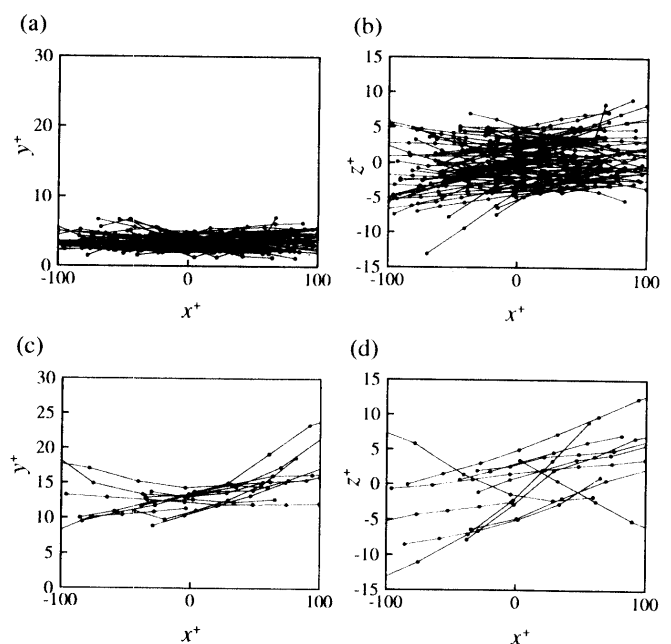


Fig.5 Typical trajectories of solid particles with the ejection(Q2) event.

(a) x - y plane, $0 < y^+ < 5$, (b) x - z plane, $0 < y^+ < 5$,
(c) x - y plane, $10 < y^+ < 15$, (d) x - z plane, $10 < y^+ < 15$.